

ботки при шлифовании. Исходя из этого, наиболее эффективным следует рассматривать вариант шлифования, когда скорость $V_{рез}$ во времени уменьшается от своего максимального значения до нуля. Очевидно, для реализации данного условия необходимо использовать автоматизированные циклы шлифования или создать в технологической системе значительный начальный натяг, который при шлифовании приведет к уменьшению во времени скорости $V_{рез}$ вплоть до нуля.

Список литературы: 1. Маслов Е.Н. Теория шлифования металлов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с. 2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 2. "Теплофизика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2003. – 625 с. 3. Новиков Ф.В. Математическая модель определения температуры при шлифовании на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – 2007. – Вип. 61. – С. 23-33. 4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / Якимов А.В., Новиков Ф.В., Новиков Г.В., Серов Б.С., Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.

Поступила в редколлегию 11.12.08

УДК 621.923

Г.В. НОВИКОВ, В.А. АНДИЛАХАЙ, А.А. МАШКО, И.Н. СНИСАРЕНКО

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ВЫСОКОПРОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Приведены результаты исследований процесса шлифования алмазными кругами на металлических связках деталей с высокопрочными покрытиями

Нанесение высокопрочных износостойких покрытий на рабочие поверхности нашло широкое применение при восстановлении высокопрочных деталей машин и стало важным фактором повышения их долговечности и работоспособности, многократного использования в процессе эксплуатации. В настоящее время номенклатура деталей, которые восстанавливаются и упрочняются покрытиями, включает сотни наименований. Вместе с тем, широкое применение покрытий сдерживается высокой трудоёмкостью их обработки при шлифовании в связи с высокими показателями твёрдости, прочностими и пластичности. Поэтому применение традиционных методов шлифования для их обработки неэффективно. В особой мере это относится к шлифованию порошковых покрытий высокой твёрдости $HRC \geq 60$, когда абразивный круг интенсивно изнашивается, теряет режущую способность и требует

постоянной правки, что существенно снижает производительность обработки. В настоящее время при обработке высокопрочных покрытий самых различных материалов все шире используются шлифовальные круги из синтетических алмазов. Так, в Институте сверхтвёрдых материалов НАН Украины разработаны процессы алмазного шлифования наплавленных покрытий, используемые в металлургическом производстве [1]. Алмазное шлифование покрытий контактных поверхностей больших и малых конусов, чаш и воронок засыпных аппаратов доменных печей позволило повысить производительность обработки и улучшить состояние поверхностного слоя. Это стало возможным благодаря использованию специально созданных алмазных кругов на металлической связке М1-10, которые удачно сочетают свойства самозатачивания режущей поверхности круга и высокую степень удержания зёрен в круге, что позволяет вести эффективную обработку износостойких покрытий типа 300 25НЗСЗГ2 твёрдостью HRC 50...55. При шлифовании покрытий твёрдостью HRC 60...62 применение алмазных кругов на металлических связках оказалось малоэффективно, т.к. при высокопроизводительном шлифовании (в особенности глубинном) алмазный круг на металлической связке интенсивно засаливается и теряет режущую способность. Введение в зону резания дополнительной энергии в виде электрических разрядов не позволяет в полной мере устранить засаливание круга, поскольку повышение мощности импульсов разрядного тока (вследствие перемигания стружками межэлектродного зазора) приводит к короткому замыканию и прекращению процесса электроэрозионного разрушения металлической связки круга и продуктов обработки. Одним из эффективных путей уменьшения интенсивности засаливания круга при шлифовании может быть увеличение площади его рабочей поверхности за счёт увеличения его наружного диаметра и высоты круга [2]. Подтверждением тому может быть разработанная и внедренная в производство технология глубинного алмазного электроэрозионного шлифования буровых инструментов с высокопрочными наплавками [3]. Технология реализует схему круглого наружного глубинного шлифования, включающую врезание алмазного круга на полную глубину резания (0,9 мм) при неподвижной детали (шарошке долотчатой коронки) и съём всего припуска за одно вращение детали с фиксированной глубиной резания (0,9 мм). Вместо абразивного круга диаметром 600 мм использован крупногабаритный алмазный круг диаметром 500 мм и шириной 50 мм на металлической связке М2-01, что позволило одновременно обрабатывать всю поверхность детали (44 мм) без применения продольной подачи. Скорость вращения детали устанавливалась равной $V_{\text{дем}} = 1$ м/мин, что соответствовало производительности обработки $900 \text{ мм}^3/\text{мин}$ мм или более $40 \text{ тыс. мм}^3/\text{мин}$, т.е. производительности применявшегося в производстве абразивного шлифования.

Экспериментальные исследования показали практически неприемлемость электроэрозионной правки круга с подводом электрического тока через зону резания. В связи с образованием длинных стружек алмазный круг на прочной металлической связке М2-01 интенсивно засаливался и через опре-

деленное время терял режущую способность независимо от электрического режима работы генератора импульсного тока. Применение электроэрозионной правки вне зоны резания с установкой специального правящего устройства (катода) позволило повысить стойкость алмазного круга, однако в полной мере решить проблему качественной очистки круга от продуктов обработки не удалось. В связи с этим был использован специальный крупногабаритный алмазный круг диаметром 500 мм и шириной 50 мм на менее прочной металлической связке М1-01, что позволило получить положительные результаты. Некоторая самозатачиваемость алмазного круга на металлической связке М1-01 в сочетании с непрерывным электроэрозионным воздействием на рабочую поверхность алмазного круга предопределили возможность качественной очистки и правки круга в процессе шлифования и поддержание высокой его режущей способности в течение смены.

Переход на полную алмазную обработку за счет снижения силовой и тепловой напряженностей процесса позволил повысить качество и точность шлифованных поверхностей (исключить сколы, микротрещины и прижоги), улучшить экологию производства за счет исключения образования абразивной пыли. Достаточно отметить, что при действующей технологии абразивного шлифования в течение смены в связи с интенсивным износом расходовалось до шести абразивных кругов диаметром 600 мм. Это сопровождалось большим выделением абразивной пыли и значительным ухудшением условий работы. Расчеты показали, что затраты на приобретение алмазных и абразивных кругов в связи с их износом оказались приблизительно одинаковыми. Таким образом, по производительности и себестоимости обработки предложенный процесс алмазного шлифования соизмерим с действующим процессом абразивного шлифования, а эффект достигается за счет повышения качества и точности обработки, улучшения экологии производства и условий труда, исключения трудоемких операций по частой замене абразивных кругов в связи с их полным износом. Необходимо отметить, что действующая технология основана на схеме врезного многопроходного шлифования с продольной осцилляцией круга. Скорость детали составляет до 60 м/мин. Попытки шлифования алмазным кругом по данной схеме привели к отрицательным результатам и, прежде всего за счет прерывистости обработки. Как известно, обрабатываемая поверхность детали (шарошки) имеет прерывистый характер. В связи с высокой скоростью детали это предопределяет ударный характер взаимодействия и значительные динамические нагрузки, которые приводят к интенсивному износу алмазного круга. Для абразивного круга такой режим шлифования является эффективным, т.к. обеспечивает непрерывную правку круга и поддержание его высокой режущей способности. Собственно этим объясняется высокий износ абразивных кругов и их частая замена в течение смены. Обрабатываемая деталь (шарошка) в данном случае выполняет роль правящего элемента. Следовательно, обработку алмазными кругами прерывистых поверхностей экономически нецелесообразно производить по схеме многопроходного шлифования с большой скоростью

детали, эффективно использовать глубинное шлифование с небольшой скоростью детали. Следует отметить, что достигнутый уровень производительности алмазного шлифования деталей с высокопрочными покрытиями – до 900 мм³/мин является в ряде случаев недостаточным для применения алмазных кругов взамен абразивных. Например, на Харьковском заводе "Потенциал" кольца (торцовые уплотнения) с рэлитовыми покрытиями шлифуются абразивным кругом с весьма высокой производительностью – свыше 1000 мм³/мин·мм. Естественно, реализовать данную производительность с использованием алмазного шлифования не удалось в связи с интенсивным засаливанием круга и потерей его режущей способности. Это требует дальнейшего поиска новых решений по эффективной очистке и правке алмазного круга в условиях высокопроизводительного шлифования высокопрочных пластичных материалов, к которым относятся покрытия. В связи с этим проведем анализ технологических возможностей алмазного электроэрозионного шлифования.

Оценку возможностей повышения производительности обработки при шлифовании $Q_{тек}(\tau)$ произведем по зависимости, полученной на основе решения уравнения баланса перемещение в технологической системе с учетом начального перемещения y_0 :

$$Q_{тек}(\tau) = Q_0 - (Q_0 - c \cdot y_0 \cdot \lambda) \cdot \exp\left(-\frac{c \cdot \lambda \cdot \tau}{\pi \cdot D_{дем} \cdot B}\right), \quad (1)$$

где $Q_0 = B \cdot V_{дем} \cdot t$ – номинальная производительность обработки, м³/с; B – ширина шлифования, м; $V_{дем}$ – скорость детали, м/с; t – глубина шлифования, м; τ – время обработки, с; c – приведенная жесткость технологической системы, Н/м; λ – удельная интенсивность съема материала, м³/(с·Н); $D_{дем}$ – диаметр детали, м; y_0 – начальное перемещение (натяг) в технологической системе, м.

В зависимости от величины y_0 из зависимости (1) вытекают три принципиальные решения: $Q_{тек} > Q_0$, $Q_{тек} = Q_0$, $Q_{тек} < Q_0$.

Увеличить $Q_{тек} > Q_0$ при $y_0 > \frac{Q_0}{c \cdot \lambda}$ можно, реализуя условие $y_0 = \Pi$,

где Π – величина снимаемого припуска, м.

При $Q_{тек} = Q_0$ будет протекать устойчивый во времени процесс шлифования. Для этого необходимо создать в технологической системе натяг величиной $y_0 = \frac{Q_0}{c \cdot \lambda}$ или обработку вести по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием $P_y = Q_0 / \lambda$. Для обеспечения постоянства во времени параметра λ необходимо использовать эффективную правку круга.

Основным условием повышения производительности обработки $Q_{тек} > Q_0$ при условии $y_0 < \frac{Q_0}{c \cdot \lambda}$ является увеличение параметра λ . Не учитывая при анализе трения связки круга с обрабатываемым материалом в процессе шлифования, параметр λ определяется:

$$\lambda = V_{кр} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{\tau_{сдв}} \cdot \left(\frac{a_z}{4 \cdot HV \cdot R} \right)^2}, \quad (2)$$

где $V_{кр}$ – скорость круга, м/с; $\tau_{сдв}$, HV – соответственно предел прочности на сдвиг и твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м²; a_z – толщина среза отдельным зерном круга, м; R – радиус округления режущей части зерна, м.

Из зависимости (2) следует, что увеличить параметр λ можно увеличением скорости круга $V_{кр}$ и соотношения a_z / R . Чем больше $\tau_{сдв}$ и HV , тем меньше λ и хуже обрабатываемость материала. Твердость материала HV в большей мере влияет на параметр λ , чем прочность материала $\tau_{сдв}$, что хорошо согласуется с практикой шлифования.

С учетом преобразований соотношения a_z / R , зависимость (2) принимает вид

$$\lambda = \frac{2 \cdot V_{кр} \cdot (1 - \eta)}{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV}, \quad (3)$$

где $\eta = \sqrt{\frac{0,5 \pi \cdot tg^2 \gamma \cdot HV \cdot x^2}{P_{y_1}}}$ – безразмерный параметр, определяющий

степень затупления зерна, изменяется в пределах 0...1 (для острого зерна $\eta \rightarrow 0$, для затупленного зерна $\eta \rightarrow 1$); 2γ – угол при вершине конусообразного режущего зерна; P_{y_1} – радиальная составляющая силы резания, действующая на зерно, Н; x – величина линейного износа зерна, м.

Из зависимости (3) следует, что увеличить параметр λ можно путем уменьшения безразмерного параметра η за счет уменьшения величины x и увеличения P_{y_1} , т.е. за счет поддержания в процессе шлифования высокой остроты режущих зерен и применения алмазных кругов из прочных алмазных зерен и металлических связок.

Производительность обработки $Q_{тек} > Q_0$, соответствующая условию $Q_{тек} = Q_0$, определяется:

$$Q_{тек} = \frac{2 \cdot V_{кр} \cdot P_y \cdot (1 - \eta)}{\pi \cdot tg \gamma \cdot HV}. \quad (4)$$

Повысить $Q_{тек} > Q_0$ можно увеличением $V_{кр}$, P_y и $(1-\eta)$, т.е. применением скоростного, силового (глубинного) шлифования, в том числе с непрерывной эффективной правкой круга. Последний фактор играет определяющую роль при шлифовании материалов повышенной твердости, поскольку увеличение параметра HV приводит к уменьшению величины $(1-\eta)$ и соответственно производительности обработки $Q_{тек} > Q_0$ в соответствии с зависимостью (4).

Из зависимости (4) также следует, что уменьшить P_y при фиксированной производительности обработки $Q_{тек} > Q_0$ можно уменьшением $\eta \rightarrow 0$.

Определены условия образования микросколов на режущих зернах при шлифовании ($\eta \rightarrow 0$), исходя из зависимости для расчета максимального касательного напряжения, возникающего в зерне:

$$\tau_{\max} = \frac{16 \cdot P_{y_1}}{x^2} \cdot (1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3, \quad (5)$$

где $K_{ш} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{сж}}{\pi \cdot \lg \gamma \cdot HV}} \cdot (1 - \eta)$ – коэффициент шлифования; $\sigma_{сж}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сжатие, Н/мм².

Произведение $(1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3$ с увеличением коэффициента шлифования $K_{ш}$ увеличивается, табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные значения произведения $(1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3$

$K_{ш}$	0	0,1	0,2	0,3	0,5
$(1 - K_{ш})^2 \cdot K_{ш}^3$	0	0,00081	0,005	0,013	0,031

Следовательно, по мере износа зерна (увеличение величины x) максимальное касательное напряжение τ_{\max} уменьшается, причем, интенсивнее с увеличением твердости обрабатываемого материала HV .

Обеспечить увеличение τ_{\max} и протекание устойчивого процесса микро-разрушения режущих зерен при шлифовании можно увеличением P_{y_1} и применением непрерывной правки круга для удаления затупленных зерен с его рабочей поверхности (с предельной величиной x , определяемой из условия $\tau_{\max} = \tau_{сдв_{зерна}}$).

Определены условия реализации процесса электроэрозионного алмазного шлифования, исходя из зависимости для расчета температуры образующихся стружек t^0 (на основе закона Джоуля-Ленца)

$$t^0 = \frac{K_1 \cdot U^2}{\rho \cdot c \cdot \rho_{ом} \cdot l \cdot V_{кр}}, \quad (6)$$

где K_1 – тепловой эквивалент работы; U – напряжение технологического тока, В; ρ и c – соответственно плотность и удельная теплоемкость обрабатываемого материала; $\rho_{ом}$ – удельное сопротивление стружки, Ом·мм²/м; l – толщина межэлектродного зазора, м.

В зависимости от величины l возможны три случая:

- 1) $l > l_{np}$ (где l_{np} – предельное значение межэлектродного зазора). Тогда $t^0 < t_{np}^0$ (где t_{np}^0 – предельное значение температуры, при которой происходит термическое разрушение стружек и металлической связи алмазного круга), т.е. процесс электроэрозии отсутствует. Согласно зависимости (6), необходимо увеличить U или уменьшить $V_{кр}$;
- 2) $l = l_{np}$, тогда $t^0 = t_{np}^0$, что указывает на протекание устойчивого процесса электроэрозии, обеспечивающего термическое разрушение стружек и металлической связи круга с интенсивностью, достаточной для поддержания его высокой режущей способности;
- 3) $l < l_{np}$, тогда $t^0 > t_{np}^0$, что указывает на протекание в начальный период интенсивного процесса электроэрозии, который с течением времени ведет к увеличению l , уменьшению t^0 до значения t_{np}^0 и стабилизации l .

В случае автономной электроэрозионной правки алмазного круга температура нагрева поверхностных слоев металлической связи определится:

$$t^0 = \frac{K_1 \cdot U^2 \cdot \tau}{\rho \cdot c \cdot \rho_{ом} \cdot l}, \quad (7)$$

где τ – время контакта фиксированной точки круга с правящим электродом (при постоянной силе тока) или время единичного импульса тока.

Увеличить t^0 (до предельного значения) и обеспечить высокую эффективность процесса электроэрозионной правки можно уменьшением l и увеличением U и τ за счет увеличения силы прижатия алмазного круга к правящему электроду и применения источника технологического тока повышенной мощности.

На рис. 1 показан характер изменения производительности обработки от глубины шлифования для различных значений силы тока I_{cp} . Как видно, с увеличением I_{cp} производительность обработки увеличивается вследствие повышения режущей способности алмазного круга на металлической связке М2-01. Это связано с усилением интенсивности электроэрозионного воздействия на рабочую поверхность круга и качественной ее очисткой от продуктов обработки, что исключает засаливание круга. Установлено, что в точках

максимума производительности обработки плотность тока фактически одинакова и равна $1,3 \cdot 1,5 \text{ А/мм}^2$.

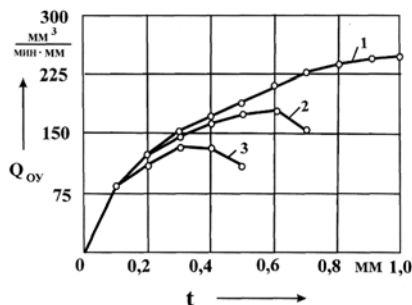


Рис. 1. Зависимость производительности обработки от глубины шлифования: 1 – $I_{cp} = 75 \text{ А}$; 2 – $I_{cp} = 48 \text{ А}$; 3 – $I_{cp} = 34 \text{ А}$; обрабатываемый материал – покрытие ПГ-10Н-01; алмазный круг – АС6 250/200 М2-01 4; максимальная толщина среза отдельным зерном $a_{z_{max}} = 15 \text{ мкм}$; $V_{кр} = 28 \text{ м/с}$.

Список литературы: 1. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – К.: Наук. думка, 1994. – 180 с. 2. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: Дис....канд. техн. наук: 05.02.08. – Харьков, 1989. – 210 с. 3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. "Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 4. Машко А.А. Определение условий повышения точности механической обработки // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – "Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні". – 2008. – Вип. 68. – С. 106-111.

Поспудила в редколлегию 11.12.08

УДК 621.923

А.Н. КОВАЛЬЧУК, Р.А. БЕРЕЖНОЙ, В.В. НЕЖЕБОВСКИЙ

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ

В работе приведен расчет и анализ шероховатости поверхности при алмазном шлифовании.

Алмазное шлифование является важным фактором повышения качества обработки деталей [1, 2]. Вместе с тем, технологические возможности алмазного шлифования в плане улучшения шероховатости поверхности полностью не изучены. Поэтому целью работы является теоретический анализ условий улучшения шероховатости поверхности при алмазном шлифовании. Для ре-